Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 15, No. 5, Dec- Jan 2020, p. 649-665

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 15، شماره 5، آذر - دی 1398، ص. 665-649

استخراج پکتین از پوست بادنجان با استفاده از مایکروویو و بررسی خصوصیات آن

سارا کرم‌زاده[1]- سارا انصاری[2*]

تاریخ دریافت: 1397/08/15
تاریخ پذیرش: 1398/02/25

چکیده

در این پژوهش از روش سطح پاسخ و طرح باکس- بنکن برای بهینه‌سازی شرایط استخراج به کمک امواج مایکروویو پکتین حاصل از پوست بادنجان استفاده شد و خصوصیات فیزیکوشیمیایی پکتین استخراجی مورد بررسی قرار گرفت. فاکتورهای مستقل مورد بررسی در این تحقیق شامل توان (360، 450 و 540 وات)، زمان (1، 2/5 و 4 دقیقه) و pH (1، 2 و 3) بودند. راندمان استخراج، درجه استریفیکاسیون، میزان گالاکتورونیک اسید و فعالیت امولسیفایری پکتین‌های استخراج شده به‌ترتیب 2/20 تا 17/16 درصد، 20/20 تا 36/23 درصد، 51/3 تا 74/7 درصد و 1/87 تا 21/64 درصد به‌دست آمد. نتایج تحقیق حاضر نشان دادکه با افزایش توان، افزایش زمان وکاهش pH، راندمان استخراج پکتین افزایش، درحالیکه درجه استریفیکاسیون کاهش یافت. میزان گالاکتورونیک اسید و فعالیت امولسیفایری با افزایش توان تا 450 وات و زمان پرتودهی تا 3 دقیقه ابتدا سیر صعودی و سپس نزولی داشت. شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر راندمان استخراج، میزان گالاکتورونیک اسید و فعالیت امولسیفایری در توان 360 وات، زمان 4 دقیقه و pH برابر با 1/0 بوده که در این شرایط پاسخ‌های فوق به‌ترتیب برابر با 18/81، 70/81 و 2/68 درصد پیش‌بینی شدند. همچنین مشاهدات نشان داد که با افزایش غلظت رفتار جریان محلول پکتین از نیوتونی به سودوپلاستیک تغییر کرد. از طرفی پایداری امولسیون پکتین استخراجی، در دمای 4 درجه بیشتر از 23 درجه سلسیوس بوده است. بر مبنای نتایج این تحقیق مایکروویو به‌عنوان یک روش نوین و با کارایی بالا برای استخراج پکتین از پوست بادنجان می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پکتین، پوست بادنجان، بهینه‌سازی، خصوصیات فیزیکوشیمیایی

مقدمه

پکتین یک استر متیله شده از پلی گالاکتورونیک اسید با اتصالات α (4→1) است که شامل زنجیره‌های 300 تا 1000 واحدی از گالاکتورونیک اسید می‌باشد و در دیواره سلولی و تیغه میانی گیاهان قرار دارد (Yeoh *et al.*, 2008). پکتین کاربردهای زیادی در صنایع غذایی و دارویی دارد. در مواد غذایی پکتین غالبا در مربا و ژله به‌عنوان عامل تشکیل ژل و قوام‌دهنده استفاده می شود. همچنین در نوشیدنی‌ها، سس‌ها، شربت‌ها[3]، محصولات قنادی، نانوایی و غیره برای ایجاد بافت مناسب به‌کار می‌رود (Yan *et al.*, 2010). در سال 2018 تقاضای جهانی برای پکتین بیش از 60 هزار تن در سال بوده که اروپا با 31 هزار تن بزرگترین بازار پکتین (حدود 420 میلیون دلار) را به‌خود اختصاص داده است (Anonymous, 2019). در ایران سالیانه حدود یک صد تن پکتین در صنایع غذایی و دارویی به مصرف می‌رسد، که همگی از خارج از کشور تامین می‌گردد و با توجه به قیمت آن در بازارهای جهانی ارزبری نسبتا چشم‌گیری دارد (انتشارات مرکز گمرک ایران، 1373). بنابراین، بررسی تولید آن در داخل کشور می‌تواند از اهمیت زیادی برخوردار باشد.

پکتین می‌تواند به‌عنوان یک محصول جانبی، از منابع مختلفی مانند تفاله سیب درختی، تفاله چغندرقند، طبق گل آفتاب‌گردان و پوست مرکبات استخراج گردد. پکتین تفاله سیب درختی به علت استفاده از آنزیم‌های پکتولیتیک در حین تولید کنسانتره آب سیب و پکتین تفاله چغندرقند به‌دلیل وجود گروه‌های استیل و پکتین طبق گل آفتاب‌گردان درجه متوکسیلاسیون پایینی دارند، در حالی که پکتین پوست مرکبات با درجه متوکسیلاسیون بالا و قدرت تولید ژل قوی بهترین منبع استخراج پکتین می‌باشند. میزان پکتین بر اساس ماده خشک در تفاله سیب درختی، تفاله چغندرقند، طبق گل آفتاب‌گردان و تفاله مرکبات به‌ترتیب 20-15، 15-20، 25 و 25-30 درصد است (Mesbahi *et al.*, 2005). بادنجان با نام علمی *Solanum melongena* یکی از سبزیجات مهم خانواده *Solanaceae* می‌باشد که در سطح وسیعی در کشورهای دنیا کشت می‌شود. در سال 2017 میزان تولید جهانی

1 و 2- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون، کازرون.
(*- نویسنده مسئول: Email: ansari@kau.ac.ir)

DOI: 10.22067/ifstrj.v16i1.76467

3 Syrups

بادنجان در جهان در حدود 52/3 میلیون تن گزارش شده است که در این میان کشور ایران با تولید 654149 تن پس از چین، هند، مصر و ترکیه در مقام پنجم قرار دارد (FAO, 2017). در حین فراوری و کنسرو سازی بادنجان، کلاهک و پوست آن جزء ضایعات بوده و دور ریخته می‌شود، درحالی که حاوی چندین ماده مغذی، اجزای سازنده و ترکیبات ارزشمند است. اگرچه میزان پکتین این ضایعات در مقایسه با میوه‌های غنی از پکتین تاحدودی کمتر است ولی با این وجود برای استخراج پکتین مناسب است. از این رو در این مطالعه، تلاش می‌شود تا از این ضایعات در جهت استخراج پکتین که ماده‌ای ارزشمند در صنایع غذایی می‌باشد، استفاده کرد.

تولید پکتین معمولا شامل استخراج، تصفیه/ تغلیظ و خشک کردن است. استفاده از یک روش مناسب برای استخراج پکتین برای به حداکثر رساندن عملکرد و کیفیت آن مهم است. شایع‌ترین روش مورد استفاده برای فرآیند استخراج پکتین شامل حرارت‌دهی مستقیم در آب اسیدی شده (روش سوکسله) است، اما به‌دلیل زمان طولانی استخراج و حجم بالای آب ضایعاتی این روش چندان مطلوب نیست (Yeoh *et al.*, 2008). ناطقی وانصاری (1396) پکتین از ضایعات کلاهک بادنجان به روش اسیدی با اسید سیتریک تحت شرایط دما (60، 75 و90 درجه سانتی گراد)، زمان (50، 100 و150 دقیقه) و pH های مختلف (1/5، 2/25 و 3) استخراج کردند. بر اساس نتایج به‌دست آمده راندمان تولید پکتین از کلاهک از 5/87 تا 12/3 درصد متغیر بود که بالاترین راندمان برای کلاهک بادنجان (12/3 درصد)، در شدیدترین شرایط استخراج یعنی در دمای 90 درجه سانتی‌گراد، زمان 150 دقیقه و pH برابر با 1/5 به‌دست آمد که درصد گالاکتورونیک اسید و درجه استری شدن برای پکتین کلاهک در همین شرایط به‌ترتیب برابر با 27/90 و 15/43 بود (ناطقی و انصاری، 1396). اخیرا تعدادی از روش‌های جدید استخراج به کمک مایکروویو[1]، استخراج به کمک اولتراسوند[2]، استخراج با سیال فوق بحرانی[3] و استخراج تسریع شده با حلال[4] به‌عنوان تکنیک‌های سازگارتر با محیط زیست و کارآمدتر برای افزایش بازیافت ترکیبات ارزش از بافت‌های گیاهی توسعه یافته‌اند (Kazemi *et al*., 2019). در مقایسه با استخراج با سیال فوق بحرانی، استخراج به کمک مایکروویو ساده‌تر و ارزان‌تر است. استخراج به کمک مایکروویو ویژگی‌های تخلخل مویرگی و ظرفیت جذب آب مواد گیاهی را افزایش داده که این تغییرات فرصتی برای بهبود عملکرد استخراج مولکول‌های هدف از مواد گیاهی را فراهم می‌سازند (Wang *et al*., 2007). اخیرا کاظمی و همکاران (2019) نیز از روش سطح پاسخ (RSM) برای بهینه‌سازی استخراج پکتین از پوست بادنجان به کمک امواج اولتراسوند استفاده کردند. بر مبنای نتایج آنها بالاترین راندمان استخراج (33/64 گرم در 100 گرم) در توان 50 وات، زمان اشعه‌دهی 30 دقیقه و pH 1/5 به‌دست آمد که پکتین حاصل دارای محتوای گالاکتورونیک اسید (66/08 گرم در 100 گرم) و فنول کل بالایی (96/81 میلی گرم معادل گالیک اسید در گرم پکتین) بوده و جزء پکتین‌های با درجه متوکسیل بالا طبقه‌بندی می‌شد.

بر مبنای تحقیقات انجام شده تاکنون، هیچ پژوهشی به بررسی اثر امواج مایکروویو بر راندمان استخراج پکتین و همچنین خصوصیات فیزیکوشیمیایی پکتین حاصل از پوست بادنجان نپرداخته است، بنابراین هدف از این پژوهش بهینه‌سازی استخراج پکتین از تفاله ناشی از پوست بادنجان و در ادامه بررسی خصوصیات پکتین‌های استخراج شده می‌باشد.

مواد و روش‌ها

پوست بادنجان از کارخانه یک و یک (دشت مرغاب، خرم بید، استان فارس) به‌عنوان ضایعات کنسروسازی گرفته شد. این ضایعات پس از شستشو با آب به قطعات کوچک بریده شدند. در مرحله بعد، در آون (Shimaz Co.، ایران) با دمای 65°C به مدت 24 ساعت خشک گردیدند تا به وزن ثابت برسند. با استفاده از آسیاب (فن آزما، ایران) پودر شده و با مش 20 الک گردیدند. پودر تولیدی برای مصارف بعدی در ظرف پلی‌اتیلنی و در جای خشک نگهداری شد. کلیه مواد شیمیایی، حلال‌ها و استانداردهای مصرفی از شرکت مرک آلمان با درجه خلوص تجزیه‌ای تهیه شدند.

استخراج پکتین

جهت استخراج پکتین، 5 گرم از نمونه پودر خشک شده در ارلن ریخته شده و 75 میلی‌لیتر محلول آبی اسید سیتریک در pHهای مختلف (نسبت حجم مایع به وزن جامد (حجمی/ وزنی) در تمام تیمارها ثابت و برابر با 15 به 1)، به آن اضافه شد. سپس نمونه طی مدت زمان مشخص درون مایکروویو (KOC-9U0 TPS ،Daewoo، کره) با حداکثر توان 900 وات قرار گرفت (جدول 1). در مرحله بعد، محلول دو مرتبه با پارچه متقال صاف شده و برای جداسازی ذرات معلق باقیمانده، محلول حاصل در rpm 4000 به مدت 20 دقیقه سانتریفوژ (Universal 320، آلمان) شد. سپس محلول پکتین به‌وسیله اتانول 98 درصد رسوب داده شد و پس از نگهداری در دمای 7°C به مدت 18 ساعت، پکتین مرطوب حاصل، 2 مرتبه با اتانول 98 درصد شستشو داده شد و نهایتا به‌وسیله آون در دمای 60°C تا رسیدن به وزن ثابت خشک گردید (Hosseini *et al.,* 2016). سپس آزمون‌های زیر بر روی پکتین‌های استخراجی انجام گردید.

---

1 Microwave-assisted extraction (MAE)
2 Ultrasound-assisted extraction
3 Supercritical fluid extraction
4 Accelerated solvent extraction

راندمان تولید پکتین

برای به‌دست آوردن راندمان تولید پکتین از فرمول زیر استفاده شد (Kazemi *et al.*, 2019):

(1) 100× (ماده اولیه/ پکتین خالص)= درصد راندمان تولید

بررسی محتوای گالاکتورونیک اسید

در این تحقیق برای اندازه‌گیری راندمان اسید گالاکتورونیک از روش متا هیدروکسی دی‌فنیل استفاده شد (Wang *et al.*, 2007). بدین ترتیب که 0/05 گرم از نمونه پکتین استخراج شده به یک بالن حجمی 250 میلی‌لیتری منتقل شده، با آب مقطر دیونیزه به حجم رسانیده شده و برای حل شدن کامل روی همزن مغناطیسی در دمای اتاق قرار گرفت. سپس یک میلی‌لیتر از محلول پکتینی تهیه شده به 3 لوله آزمایش (دو لوله برای اندازه‌گیری جذب نمونه حاوی پکتین و یک لوله برای اندازه‌گیری جذب نمونه شاهد) غوطه‌ور در حمام آب یخ (فن آزما، ایران) به‌منظور سرد شدن اضافه گردید. بعد از سرد شدن نمونه‌ها 6 میلی‌لیتر محلول 0/0125 مولار تترابورات سدیم در اسید سولفوریک غلیظ به آنها اضافه و کاملا مخلوط شدند. در ادامه لوله‌های آزمایش به مدت 6 دقیقه در حمام آب جوش 100°C حرارت‌دهی شده و سپس در حمام یخ سریعا سرد شدند. 0/1 میلی‌لیتر از معرف محلول 0/15% وزنی/ حجمی متاهیدروکسی دی‌فنیل به دو لوله آزمایش حاوی نمونه پکتینی اضافه شد و جذب آنها پس از گذشت 15 دقیقه با استفاده از اسپکتروفتومتر مرئی/ ماورای بنفش (UV210، Unico، اسپانیا) در طول موج 520 نانومتر اندازه گیری شد. منحنی استاندارد جذب/ غلظت با اندازه‌گیری جذب محلول‌های استاندارد گالاکتورونیک اسید در محدوده غلظت 20 تا 100 میکروگرم بر میلی‌لیتر تهیه شد.

درجه استریفیکاسیون[1]

درجه استریفیکاسیون پکتین با استفاده از روش تیتراسیون با کمی تغییر اندازه‌گیری شد. بدین منظور 0/2 گرم از نمونه پکتین خشک شده، با 2 میلی‌لیتر اتاتول 98% مرطوب شد. سپس 20 میلی‌لیتر آب مقطر دیونیزه به آن اضافه شده و تا حل شدن کامل در دمای 40°C بر روی همزن مغناطیسی قرار گرفت. بعد از حل شدن کامل نمونه، با سود 0/1 نرمال در حضور معرف فنل فتالئین تا ظهور رنگ صورتی کم‌رنگ تیتر شد و حجم سود مصرف شده به‌عنوان V_1 ثبت گردید. به محلول خنثی شده در مرحله اول تیتراسیون، 10 میلی‌لیتر سود 0/1 مولار اضافه و به مدت 2 ساعت بر روی همزن مغناطیسی به‌هم زده شد تا پکتین صابونی شود. سپس 10 میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید 0/1 مولار به آن اضافه و اسید اضافی مجددا با سود 0/1 نرمال تا رسیدن به همان نقطه پایانی تیتر شد و حجم سود مصرفی به‌عنوان V_2 یادداشت گردید. درصد استری شدن با توجه به معادله زیر محاسبه شد (Mesbahi *et al.*, 2005):

$$DE\ (\%) = \frac{V_2}{V_1+V_2} \times 100 \qquad (2)$$

اندازه‌گیری خصوصیات امولسیونی

در این تحقیق، از روش Dalev و Simeonova (1995) با کمی تغییر برای اندازه گیری فعالیت امولسیفایری[2] و پایداری امولسیون[3] استفاده شد. بدین منظور 5 میلی‌لیتر روغن آفتاب گردان، با 5 میلی‌لیتر محلول پکتین 0/5 درصد وزنی/ وزنی و 0/02 درصد سدیم آزید برای جلوگیری از رشد باکتری‌ها به آن اضافه شد. در مرحله بعد نمونه‌ها با هموژنایزر (ارتعاشات صنعتی، ایران) در دور 10000rpm به مدت 4 دقیقه مخلوط شدند. سپس امولسیون ایجاد شده برای 5 دقیقه در دور 3000 rpm سانتریفوژ گردید. فعالیت امولسیونی با توجه به معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$EA\ (\%) = \frac{ELV}{W_v} \times 100 \qquad (3)$$

در معادله بالا، EA فعالیت امولسیونی، ELV حجم لایه امولسیون شده و W_v حجم کل محلول می‌باشد.

برای اندازه‌گیری پایداری امولسیون، نمونه به مانند روش بالا تهیه و در چهار لوله سانتریفوژ 10 میلی‌لیتری ریخته شد. دو لوله برای اندازه‌گیری پایداری امولسیون در دماهای پایین، در دمای 4°C به مدت 1 و 30 روز و 2 لوله دیگر نیز در دمای 23°C برای مدت مذکور قرار گرفتند. در نهایت پایداری امولسیون با استفاده از معادله زیر به‌دست آمد:

$$ES\ (\%) = \frac{VE_r}{VE_i} \times 100 \qquad (4)$$

EA پایداری امولسیون، VE_r حجم لایه امولسیون باقی‌مانده و VE_i حجم لایه امولسیون اولیه می‌باشد.

اندازه‌گیری ویسکوزیته

ویسکوزیته غلظت‌های مختلف محلول پکتین به‌وسیله ویسکومتر چرخشی (LVDV-II Pro, Brookfield Engineering Inc، آمریکا) در دمای 25°C اندازه‌گیری شد. برای هر آزمون حدود 20 میلی‌لیتر از نمونه به سیلندر اندازه‌گیری منتقل شده و تغییرات ویسکوزیته در برابر افزایش نرخ برش در محدوده $12\text{-}110 s^{-1}$ اندازه‌گیری شد. برای آنالیز رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها از مدل‌های نیوتونی و قانون توان استفاده شد (Kazemi *et al.*, 2019).

1 Degree of estrification (DE)
2 Emulsifying activity (EA)
3 Emulsion stability (ES)

طیف FT-IR

در این مطالعه، طیف FT-IR پکتین با تفکیک پذیری $4\ cm^{-1}$، به‌وسیله اسپکتروفوتومتر FT-IR پرکین المر با استفاده از صفحه پتاسیم برماید در دامنه $400-4000cm^{-1}$ رسم گردید (Kazemi *et al.*, 2019).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

در این تحقیق، برای آنالیز داده‌ها و دستیابی به شرایط بهینه تولید پکتین از پوست بادنجان، از نرم افزارMinitab 16، روش سطح پاسخ، طرح باکس- بنکن که هم اثر فاکتورها به‌صورت تک و هم برهمکنش میان فاکتورها را با کاهش تعداد آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد، استفاده شد. در این تحقیق، اثر سه متغیر (توان مایکروویو، زمان پرتودهی و pH) در سه سطح، با سه تکرار در مرکز (برای محاسبه خطا)، بر پاسخ‌های راندمان تولید پکتین، درجه استریفیکاسیون، میزان گالاکتورنیک اسید و فعالیت امولسیفایری مورد بررسی قرار گرفت (جدول 1).

نتایج و بحث

17 تیمار جهت استخراج پکتین تحت شرایط تعیین شده در طرح باکس- بنکن به روش سطح پاسخ به‌کار گرفته شد که جدول 1 شرایط هر تیمار استخراجی و نیز مقادیر اندازه‌گیری شده هر پاسخ (راندمان، درجه استریفیکاسیون، میزان گالاکتورنیک اسید و فعالیت امولسیفایری) تحت شرایط استخراج به‌کار رفته را نشان می‌دهد.

جدول 1- سطوح متغیرها (زمان، pH و توان مایکروویو) و پاسخ‌های مربوط به استخراج پکتین از پوست بادنجان

تیمارها	متغیرهای مستقل			پاسخ‌های اندازه‌گیری شده			
	توان (W)	زمان (min)	pH	راندمان تولید (%)	درجه استریفیکاسیون (%)	گالاکتورونیک اسید (%)	فعالیت امولسیفایری (%)
1	360	1	2	5/94	21/38	51/30	1/50
2	540	1	2	6/16	20/20	57/60	3/00
3	360	4	2	9/90	36/23	65/70	4/50
4	540	4	2	12/98	26/14	57/60	6/00
5	360	2/5	1	8/80	29/70	68/40	7/50
6	540	2/5	1	10/56	25/54	66/10	9/00
7	360	2/5	3	2/20	29/70	58/90	10/50
8	540	2/5	3	5/94	23/76	67/00	12/00
9	450	1	1	5/28	22/57	63/00	13/50
10	450	4	1	17/16	31/02	73/80	15/00
11	450	1	3	6/60	21/60	62/10	16/50
12	450	4	3	6/16	30/88	70/20	18/00
13	450	2/5	2	5/72	27/32	72/40	19/50
14	450	2/5	2	6/82	28/51	74/70	21/00
15	450	2/5	2	6/60	28/51	72/40	22/50
16	450	2/5	2	6/27	27/39	72/90	24/00
17	450	2/5	2	6/49	27/75	73/30	21/20

نتایج مربوط به آنالیز آماری در جدول 2 و 3 آورده شده است. نتایج نشان داد که مدل رگرسیونی مربوط به این پاسخ‌ها در سطح اطمینان 5 درصد معنی‌دار بوده و همچنین آزمون عدم برازش برای این پارامترها بی‌معنی بوده است. همچنین ضریب تبیین برای راندمان استخراج برابر با 99/12 درصد و همچنین ضریب تبیین تعدیل شده برابر با 98/00 درصد بوده است، که این نشان‌دهنده برازش خوب مدل پیش‌بینی شده با داده‌های تجربی می‌باشد. نتایج آنالیز واریانس برای درجه استریفیکاسیون نیز مانند راندمان نشان از بالا بودن ضریب تبیین (99/00 درصد) و ضریب تبیین تعدیل شده (97/72 درصد) داشته است، که نشان‌دهنده برازش خوب مدل پیش‌بینی شده می‌باشد.

جدول 2- نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای راندمان استخراج و درجه استریفیکاسیون

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	ارزش F	ارزش P
(الف) راندمان					
رگرسیون	9	187/51	20/83	87/98	0/00
خطی	3	125/99	0/29	1/01	0/44
درجه دوم	3	20/54	6/85	28/91	0/00
اثرات متقابل	3	40/97	13/66	57/67	0/00
خطای باقیمانده	5	1/66	0/24		
عدم برازش	3	0/96	0/32	1/82	0/28
خطای خالص	2	0/70	0/17		
کل	14	189/17			
ضریب تبیین			0/99		
ضریب تبیین تعدیل شده			0/98		
(ب) درجه استریفیکاسیون					
رگرسیون	9	273/54	30/39	77/06	0/00
خطی	3	243/60	13/38	33/94	0/00
درجه دوم	3	9/13	3/04	7/72	0/01
اثرات متقابل	3	20/81	6/94	17/59	0/00
خطای باقیمانده	5	2/76	0/39		
عدم برازش	3	1/39	0/47	1/37	0/37
خطای خالص	2	1/36	0/34		
کل	14	276/30			
ضریب تبیین			0/99		
ضریب تبیین تعدیل شده			0/98		

میزان ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل شده برای میزان گالاکتورونیک اسید به‌ترتیب برابر با 98/00 درصد و 95/43 درصد بوده است. این اعداد برای میزان امولسیفایری نیز به‌ترتیب برابر با 98/48 درصد و 96/53 درصد بوده است که نشان‌دهنده برازش خوب مدل پیش‌بینی شده بوده است.

معادلات درجه دو پیش‌بینی شده برای پارامترهای مختلف که نوعی روابط ریاضی جهت دستیابی به شرایط بهینه با برقراری ارتباط بین متغیرها می‌باشند، به‌صورت کد شده در زیر آمده است:

$$Yield\ (\%) = 14.68 - 0.04X_1 - 1.2X_2 - 1.05X_3 + 0.00X_1^2 + 0.95X_2^2 + 0.27X_3^2 + 0.01X_1X_2 + 0.01X_1X_3 - 2.05X_2X_3 \quad (1)$$

$$DE\ (\%) = -7.95 + 0.09X_1 + 13.21X_2 + 1.90X_3 - 0.01X_1^2 - 0.57X_2^2 - 0.1X_3^2 - 0.01X_1X_2 - 0.005X_1X_3 + 0.14X_2X_3 \quad (2)$$

$$GA\ (\%) = -170.65 + 0.97X_1 + 30.2X_2 - 15.88X_3 - 0.001X_1^2 - 2.87X_2^2 + 0.59X_3^2 - 0.02X_1X_2 + 0.03X_1X_3 - 0.45X_2X_3 \quad (3)$$

$$EA\ (\%) = -301.90 + 1.34X_1 + 13.96X_2 + 1.28X_3 - 0.001X_1^2 - 2.64X_2^2 + 0.05X_3^2 + 0.000X_1X_2 - 0.000X_1X_3 - 0.000X_2X_3 \quad (4)$$

در این معادلات X_1: توان، X_2: زمان و X_3: pH می‌باشد.

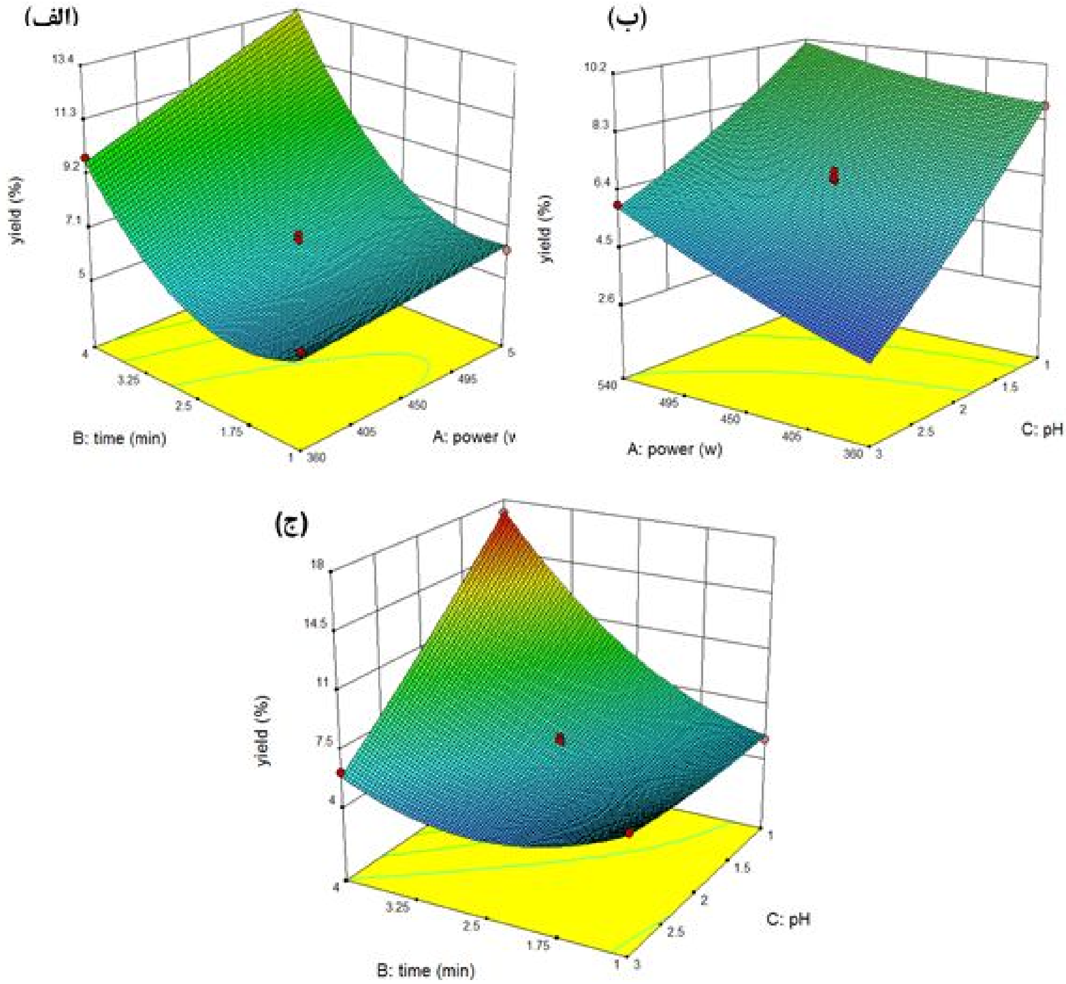
جدول 3- نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای میزان گالاکتورونیک اسید و فعالیت امولسیفایری

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	ارزش F	ارزش P
(الف) میزان گالاکتورونیک اسید					
رگرسیون	9	758/50	84/27	38/15	0/00
خطی	3	162/06	171/43	77/60	0/00
درجه دوم	3	515/73	171/91	77/82	0/00
اثرات متقابل	3	80/70	26/90	12/18	0/00
خطای باقیمانده	5	15/46	2/20		
عدم برازش	3	11/85	3/95	4/38	0/09
خطای خالص	2	3/61	0/90		
کل	14	773/96			
ضریب تبیین			0/98		
ضریب تبیین تعدیل شده			0/95		
(ب) فعالیت امولسیفایری					
رگرسیون	9	819/58	91/06	50/52	0/00
	3	32/62	196/65	109/06	0/00
	خطی	786/96	262/32	145/54	0/00
	درجه دوم	0/00	0/00	0/00	1/00
	اثرات متقابل	12/61	1/80		
عدم برازش	خطای باقیمانده	1/12	0/37	0/13	0/94
خطای خالص	2	11/49	2/87		
کل	14	832/20			
ضریب تبیین			0/98		
ضریب تبیین تعدیل شده			0/96		

اثر شرایط استخراج بر راندمان تولید پکتین

همانطور که در جدول 1 نشان داده شد، راندمان استخراج پکتین از پوست بادنجان در دامنه 2/20 تا 17/16 درصد متغیر بوده است. بیشترین راندمان استخراج مربوط به آزمایش شماره 10 (توان 450 وات، زمان 4 دقیقه و pH برابر با 1) و کمترین آن مربوط به آزمایش شماره 7 (توان 360 وات، زمان 2/5 دقیقه و pH برابر با 3) بوده است.

همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌شود توان مایکروویو یکی از مهمترین فاکتورهایی است که روی راندمان استخراج موثر بوده و سبب افزایش آن می‌شود. افزایش انرژی پرتودهی مایکروویو می‌تواند سبب افزایش نفوذ حلال استخراج به داخل ماده جامد و افزایش فعل و انفعالات مولکول‌ها با میدان مغناطیسی شده و در نتیجه سبب افزایش انتشار پکتین از ماده جامد به حلال می‌شود (Yan *et al*., 2010). طبق مطالعات ناطقی و انصاری (1396) بازده استخراج پکتین از کلاهک بادنجان به روش مرسوم بین 0/87تا 12/30 درصد متغیر بود که در مقایسه با تحقیق حاضر بسیار پایین بود. طبق گزارشات آنها افزایش دما از 60 به 90 درجه سانتی‌گراد، زمان استخراج از 50 به 150 دقیقه و کاهش pH از 3 به 1/5 اثر معنی دار در افزایش بازده پکتین داشت ($p<0/05$). کاظمی و همکاران (2019) نیز در تحقیق خود نتایج مشابهی را در زمینه استخراج پکتین از پوست سبز پسته با استفاده از روش مایکروویو گزارش نمودند و انرژی پرتودهی را به‌عنوان عاملی مهم در استخراج پکتین عنوان نمودند. زمان پرتودهی یکی دیگر از فاکتورهای موثر بر راندمان استخراج پکتین می‌باشد. افزایش زمان پرتودهی تاثیر مثبت روی راندمان استخراج می‌گذارد (شکل 1). باقریان و همکاران (2011) به نتایج مشابه در زمینه استخراج پکتین از گریپ فروت و Li و همکاران (2012) نیز به نتایج مشابه در زمینه استخراج پکتین از پالپ چغندرقند دست یافتند. این مقوله ممکن است مربوط به افزایش نفوذ حلال به داخل ماتریکس ماده جامد در اثر افزایش زمان و در نتیجه ایجاد فرصت کافی برای حل شدن پکتین در حلال استخراج باشد (Samavati, 2013).



شکل 1-اثر متغیرهای مستقل توان/ زمان (الف)، توان/ pH (ب) و زمان/ pH (ج) بر راندمان استخراج پکتین پوست بادنجان

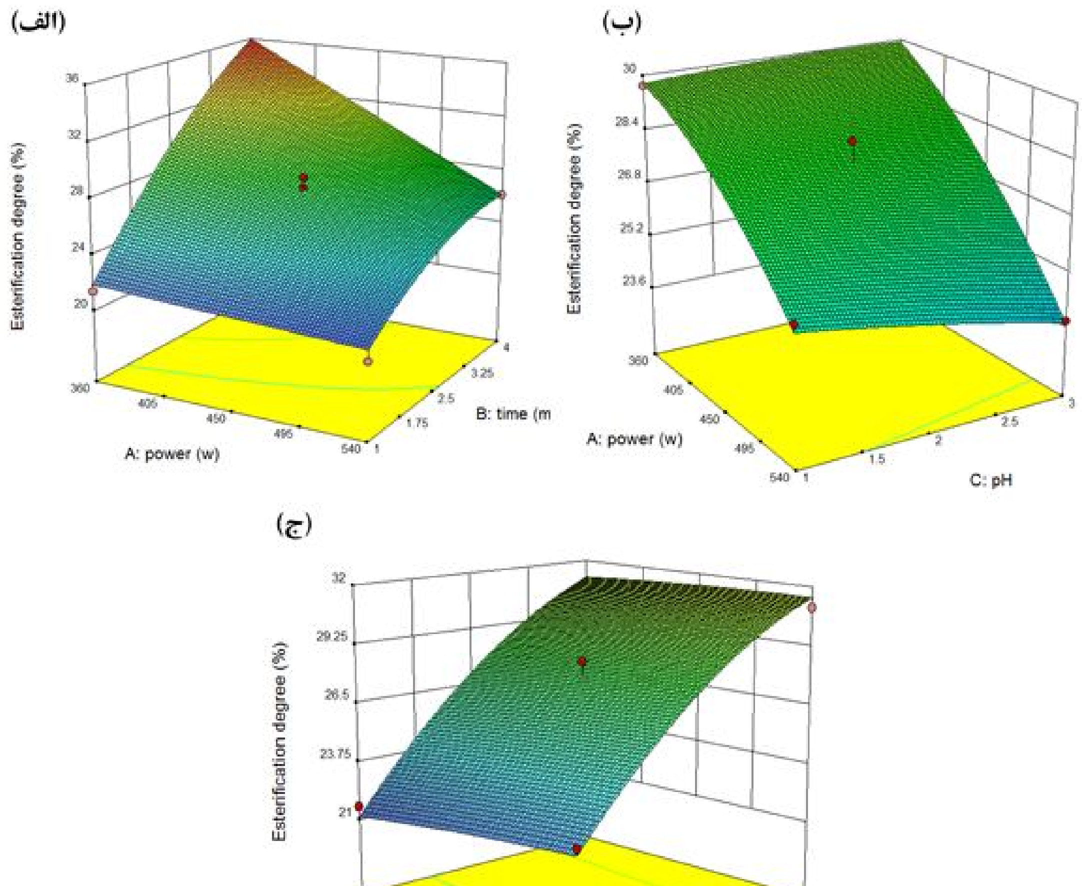
pH یکی از فاکتورهای کلیدی موثر بر راندمان استخراج می‌باشد و انتخاب pH مناسب برای رسیدن به حداکثر راندمان امری ضروری است. شکل 1 به وضوح نشان می‌دهد که راندمان استخراج با کاهش pH افزایش می‌یابد. حلال استخراج با اسیدیته بالا سبب هیدرولیز پکتین‌های غیرمحلول و تبدیل آن ها به پکتین محلول شده و در نتیجه راندمان استخراج افزایش می‌یابد (Maran *et al*., 2013; Ma *et al.*, 2013). همراستا با نتایج مطالعه حاضر، ناطقی و انصاری (1396) نیز گزارش نمودند که بازده استخراج پکتین از ضایعات کلاهک بادنجان با کاهش pH افزایش یافته است. این محققین عنوان نمودند که این پدیده می تواند مربوط به تاثیر اسید بر دیواره سلولی محصول اولیه و ازادسازی پکتین در محلول استخراج شده باشد. بنابراین هرچه اسید قوی تر باشد، تخریب دیواره سلولی بیشتر می‌گردد و در نتیجه آزادسازی و تولید پکتین نیز بیشتر خواهد بود.

اثر شرایط استخراج بر درجه استریفیکاسیون پکتین استخراجی

همانطور که در جدول 1 مشاهده می‌شوند درجه استریفیکاسیون در این پژوهش بین 20/20 و 36/23 درصد متغیر بوده است. بیشترین درجه استریفیکاسیون مربوط به تیمار شماره 3 (توان 360 وات، زمان 4 دقیقه و pH برابر با 2) و کمترین آن مربوط به تیمار شماره 2 (توان 540 وات، زمان 1 دقیقه و pH برابر با 2) بوده است. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که بین درجه استریفیکاسیون و راندمان استخراج رابطه مستقیمی وجود ندارد، زیرا بالاترین راندمان استخراج مربوط به شرایط بهینه استخراج بوده درحالیکه درجه استریفیکاسیون در این شرایط در بیشترین حد نبوده است. بنابر نتایج این تحقیق پکتین به‌دست آمده از پوست بادنجان را می‌توان جزوی از پکتین‌ها با درجه استری پایین طبقه‌بندی کرد. پکتین با درجات استری متفاوت دارای کاربردهای

متفاوتی می‌باشند. از این رو، پکتین به‌دست آمده از این محصول، به دلیل پایین بودن درجه استری آن، برای تولید محصولات با شکر کم مثل ژله‌ها و مرباهای کم‌کالری بسیار مناسب است (Wai *et al.*, 2009).

اثر زمان پرتودهی، توان مایکروویو و pH روی درجه استریفیکاسیون در شکل 2 آورده شده است. درجه استریفیکاسیون با افزایش زمان پرتودهی افزایش می‌یابد اما درجه استریفیکاسیون با افزایش pH کاهش یافته است. این کاهش می تواند به علت تجزیه پیوندهای استری پکتین در شرایط سخت هیدرولیز اسیدی و زمان پرتودهی بالا باشد. طبق نتایج باقریان و همکاران (2011) درجه استریفیکاسیون با افزایش زمان حرارت دهی مایکروویو از 2 به 8 دقیقه افزایش یافت. ناطقی و انصاری (1396) در رابطه با استخراج پکتین از ضایعات کلاهک بادنجان عنوان کردند که کاهش pH، افزایش دما و زمان استخراج علی‌رغم افزایش راندمان، درجه استریفیکاسیون پکتین را به میزان قابل توجهی کاهش داد که این کاهش را به داستریفیکاسیون زنجیره پلی گالاکتورونیک در شرایط سخت نسبت دادند (ناطقی و انصاری، 1396).



شکل 2-اثر متغیرهای مستقل توان/ زمان (الف)، توان/ pH (ب) و زمان/ pH (ج) بر درجه استریفیکاسیون پکتین پوست بادنجان

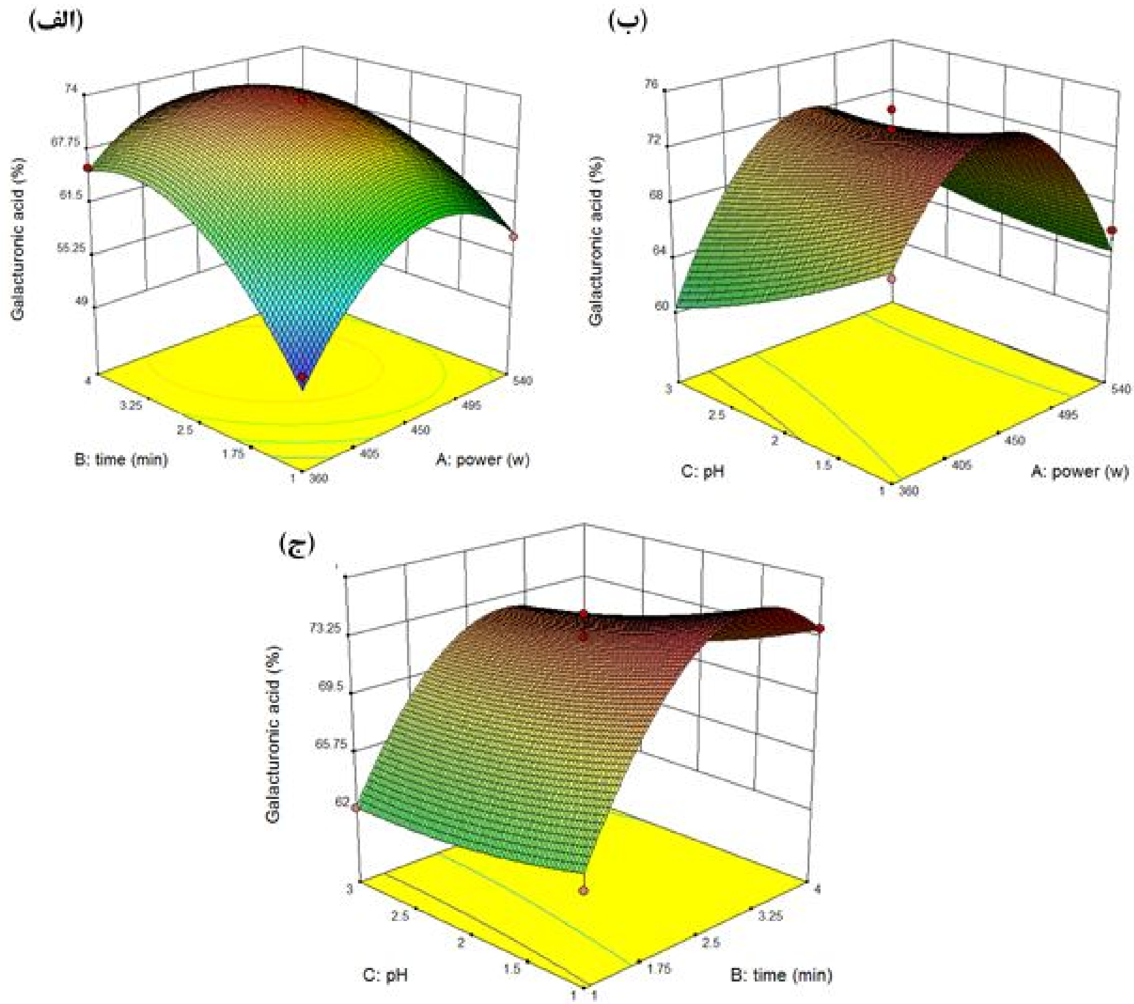
این نتیجه در گزارشات بسیاری از محققین دیگر مشاهده شده است که به بررسی اثر فاکتورهای مختلف بر درجه استریفیکاسیون پکتین استخراجی از گریپ فروت و چغندرقند پرداختند (Bagherian *et al.*, 2011). توان مایکروویو یکی دیگر از فاکتورهای موثر روی راندمان استخراج می باشد. همانطور که مشاهده می‌شود درجه استریفیکاسیون با افزایش توان مایکروویو به‌طوری معنی‌داری کاهش می‌یابد که این احتمالا مربوط به هیدرولیز شدن پیوندهای استری در اثر افزایش توان و دما می باشد (Hosseini *et al.*, 2016). همراستا با نتایج مطالعه

حاضر، کاظمی و همکاران (2019) نیز عنوان نمودند که با افزایش توان مایکروویو، درجه استریفیکاسیون پکتین استخراج شده از پوست سبز پسته کاهش یافته است.

به‌طور کلی پکتین به‌دست آمده از آزمایشاتی که در آن‌ها از شرایط بسیار سخت (توان بالا، زمان طولانی و pH بسیار پایین) برای استخراج استفاده شده است دارای درجه استریفیکاسیون پایین‌تری می‌باشند، زیرا شرایط سخت استخراج سبب افزایش استرزدایی زنجیره‌های پکتین می‌شود (Mort *et al.*, 1993).

اثر شرایط استخراج بر درصد گالاکتورورنیک اسید

با توجه به اینکه گالاکتورونیک اسید ترکیب اصلی پکتین است میزان آن نشان‌دهنده درجه خلوص پکتین استخراجی است. همه انواع پکتین با محتوای بالای گالاکتورونیک اسید توصیف می‌شوند و با توجه به نظر سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) و اتحادیه اروپا (EU) پکتین مورد استفاده به‌عنوان افزودنی غذایی و یا به هدف دارویی باید حداقل 65 درصد گالاکتورونیک اسید داشته باشد (Bagherian *et al.*, 2011).



شکل 3-اثر متغیرهای مستقل توان/ زمان (الف)، توان/ pH (ب) و زمان/ pH (ج) بر میزان گالاکتورونیک اسید پکتین پوست بادنجان

میزان گالاکتورونیک اسید در این پژوهش بین 74/7 و 51/3 درصد متغیر بوده است (جدول 1). با در نظر گرفتن آنکه بالاترین راندمان استخراج (17/16درصد) مربوط به تیمار 10 می‌باشد، بیشترین میزان گالاکتورونیک اسید نیز مربوط به همین تیمار (توان 450 وات، زمان 4 دقیقه و pH برابر با 1) بوده است. بر این اساس غالب تیمارهای به‌کار رفته برای استخراج پکتین پوست بادنجان میزان گالاکتورونیک اسید بیشتر از حد توصیه شده دارند. همچنین این مقدار مشابه با میزان گالاکتورونیک اسید گزارش شده برای پکتین استخراجی از پوست بادنجان به روش اولتراسوند (66/08 گرم در 100گرم) بود (Kazemi *et al.*, 2019). در تحقیقی که توسط ناطقی و انصاری (1396) انجام

شد، میزان گالاکتورونیک‌اسید پکتین استخراجی از کلاهک بادنجان به روش مرسوم در حدود 84/39-9/27 درصد گزارش شد، که این مقدار پایین تر از میزان بدست آمده در تحقیق حاضر است. طبق گزارشات این محققین، در pH و زمان های متفاوت استخراج با افزایش دما از 75 به 90 درجه سانتی گراد و pH از 1/5 به 2/25 درصد گالاکتورونیک اسید به شکل معنی‌داری افزایش یافت و زمان اثر معنی‌داری بر روی آن نداشت. این محققین یکی از دلایل افزایش خلوص (میزان گالاکتورونیک اسید) در pH برابر 2/25 و دمای 90 درجه سانتی‌گراد راهیدرولیز اساسی قندهای خنثی پکتین در pH بیشتر از 2 و دماهای بالا عنوان کردند. همچنین کاهش خلوص پکتین در pH برابر 1/5 و دماهای بالاتر استخراج احتمالاً به‌دلیل هیدرولیز جزئی پکتین با وزن مولکولی بالا به زنجیره پکتینی با وزن مولکولی پایین در حضور اسیدی قوی بود که این مولکول ها ممکن است با افزایش الکل رسوب ندهند. در تحقیقی دیگر Yapo و همکاران (2007)، و Ma و همکاران (2013) درصد گالاکتورونیک‌اسید پکتین استخراج شده از تفاله چغندرقند را به‌ترتیب در دامنه 3/76- 2/35 درصد و 8/77- 2/60 درصد گزارش کردند و بیان داشتند مهمترین عامل بر میزان گالاکتورونیک‌اسید، نوع اسید و pH بوده، به‌طوری که با کاهش pH و قویتر شدن اسید مورد استفاده درصد گالاکتورونیک‌اسید افزایش می‌یابد. در نتیجه می‌توان بیان داشت که پکتین استخراج شده از پوست بادنجان در شرایط بهینه، دارای خلوص مطلوبی می باشد.

شکل 3 تاثیر شرایط استخراج به کمک مایکروویو را بر روی محتوای گالاکتورونیک اسید نشان می‌دهد. افزایش توان تا 450 وات محتوای گالاکتورونیک اسید پکتین افزایش وسپس کاهش یافت. با افزایش زمان پرتودهی تا حدود 3 دقیقه نیز میزان این پارامتر افزایش و پس از آن کاهش یافت. pH نیز رابطه عکس با میزان این پارامترها داشت. با توجه به شکل مذکور می‌توان بیان داشت که با افزایش توان و زمان مصرفی تا حدی و همچنین کاهش pH میزان گالاکتورونیک اسید افزایش یافته است که این احتمالا مربوط به افزایش راندمان تولید پکتین بوده که رابطه مستقیمی با میزان گالاکتورونیک اسید داشته است. همچنین با ادامه افزایش در توان و زمان مصرفی میزان گالاکتورونیک اسید کاهش یافته است که این می‌تواند مربوط به تخریب ساختار پکتین به دلیل افزایش توان و زمان مصرفی بوده است که منجر به کاهش میزان این فاکتور شده است. حسینی و همکاران (2016) و باقریان و همکاران (2011) در تحقیقی اثر شرایط استخراج به کمک مایکروویو را روی میزان گالاکتورونیک اسید پکتین پوست نارنج و گریپ فروت مورد بررسی قرار دادند که به نتایج مشابهی دست یافتند. در کل بنا بر نتایج تحقیق حاضر استفاده از روش مایکروویو موجب تسریع استخراج پکتین با بازدهی بالاتر و خلوص بالاتر (درصد گالاکتورونیک اسید بالاتر) می‌شود

اثر شرایط استخراج بر خصوصیات امولسیفایری

همانطور که در جدول 1 مشاهده می‌شود میزان فعالیت امولسیفایری پکتین در این پژوهش بین 1/87 و 21/64 درصد متغیر بوده است. به عبارت دیگر بیشترین فعالیت امولسیفایری مربوط نقطه مرکزی (توان 450 وات، زمان 2/5 دقیقه و pH برابر با 2) و کمترین آن مربوط به آزمایش شماره 1 (توان 360 وات، زمان 1 دقیقه و pH برابر با 2) بوده است. نتایج بررسی اثر شرایط استخراج روی میزان فعالیت امولسیفایری در شکل 4 نشان داده شده است. با افزایش توان تا 450 وات میزان این پارامترها افزایش و سپس کاهش یافت. با افزایش زمان پرتودهی تا حدود 3 دقیقه، میزان این پارامترها افزایش و سپس کاهش یافت. pH نیز رابطه عکس با میزان این پارامترها داشت. همانطور که در شکل مذکور نشان داده شده است در ابتدا افزایش توان و زمان مصرفی سبب افزایش فاکتور مذکور شده است که این می‌تواند به دلیل باز شدن ساختار پکتین و قرار گرفتن گروه های هیدروفوب در سطح می باشد که سبب افزایش فعالیت امولسیفایری شده است (Jafari *et al.*, 2017). اما با ادامه در افزایش فاکتورهای مذکور میزان این پارامتر کاهش یافته است که این می‌تواند به دلیل تخریب ساختار پکتین به دلیل شرایط سخت استخراج باشد (Hosseini *et al.*, 2016).

بهینه‌سازی

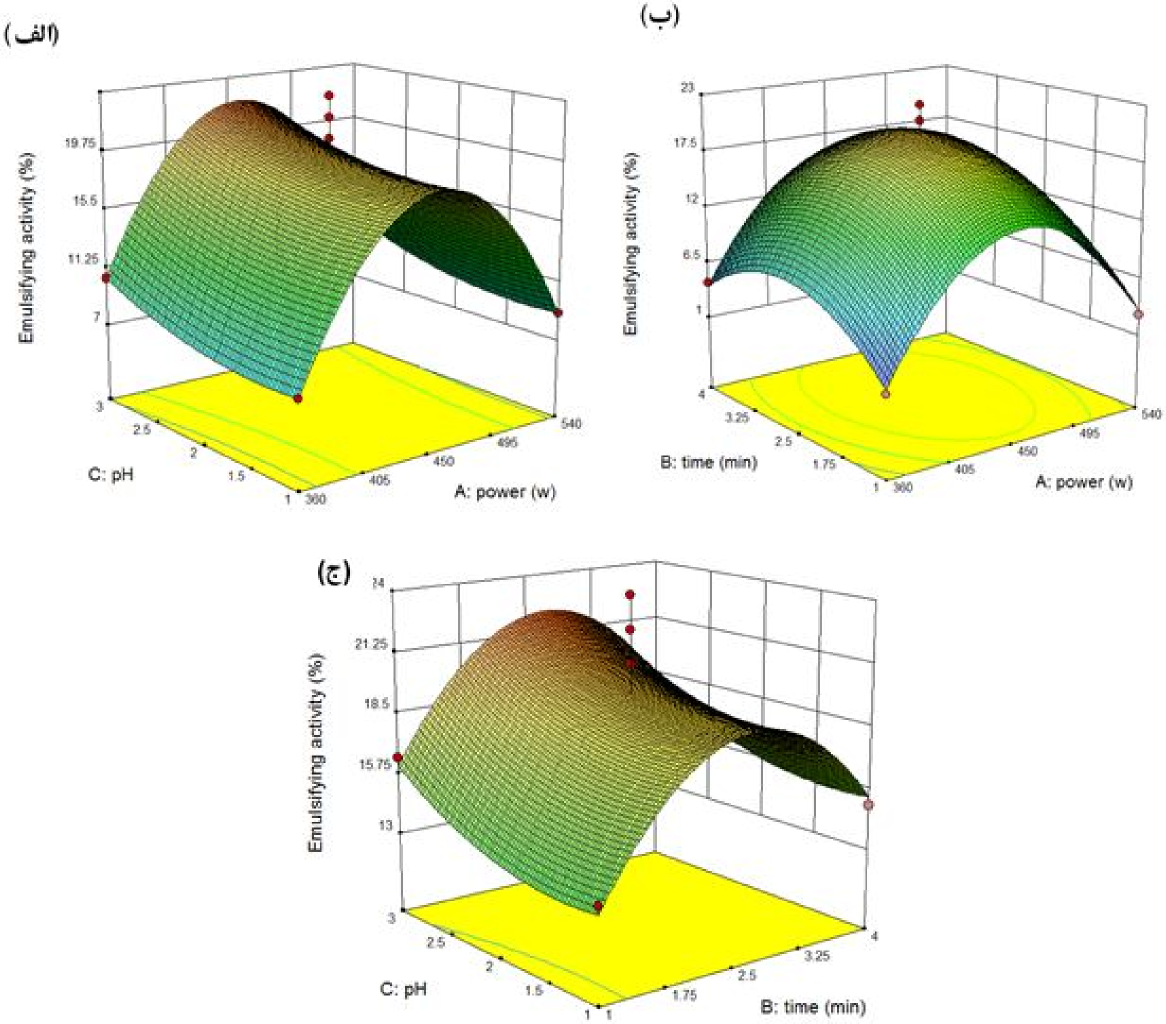
همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر راندمان استخراج، میزان گالاکتورونیک اسید و فعالیت امولسیفایری در توان 360 وات، زمان 4 دقیقه و pH برابر با 1/0 بوده که راندمان استخراج در این شرایط برابر با 16/17، میزان گالاکتورنیک اسید برابر با 70/81 ، میزان فعالیت امولسیفایری برابر با 2/68 درصد و درجه استریفیکاسیون برابر با 35/31 پیش‌بینی شده‌اند.

آزمون تائیدیه که شامل بررسی میزان این پارامترها در شرایط بهینه پیش‌بینی شده با سه تکرار بود، با توجه به نزدیک بودن میزان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نشان از صحت میزان اعداد پیش‌بینی شده داشت.

پایداری امولسیون

یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های استفاده شده برای بهبود پایداری امولسیون‌های روغن در آب کاربرد امولسیفایرها است. پکتین نیز یکی از امولسیفایرهای مورد استفاده برای پایدارکردن امولسیون‌های روغن در آب می‌باشد. بنابراین در مطالعه حاضر پایداری امولسیون حاصل از روغن و محلول 0/5 درصدی پکتین استخراج شده در شرایط بهینه در دماهای 4 و 23 درجه سلسیوس به‌ترتیب بعد از 1

روز برابر با 77/8 و 66/7 درصد، و بعد از 30 روز برابر با 77/6 و 66/1 درصد بوده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان داشت که پایداری امولسیون‌ها در هر دو دمای مورد آزمایش مطلوب بوده، اما امولسیون‌ها در دمای 4 درجه سلسیوس مقداری پایدارترند. به‌نظر می‌رسد که در دماهای بالاتر، حرکات براونی بیشتری در بین قطرات امولسیون برقرار می‌گردد که این پدیده موجب افزایش به‌هم پیوستگی قطرات امولسیون و کاهش پایداری می‌گردد. این نتایج مشابه گزارشات Yapo و همکاران (2007) می باشد که به بررسی خصوصیات امولسیونی پکتین استخراج شده از چغندرقند پرداختند. به علاوه همانطور که نتایج نشان می‌دهند در طی یک ماه نگهداری نیز پایداری امولسیون‌ها تقریبا ثابت مانده است.



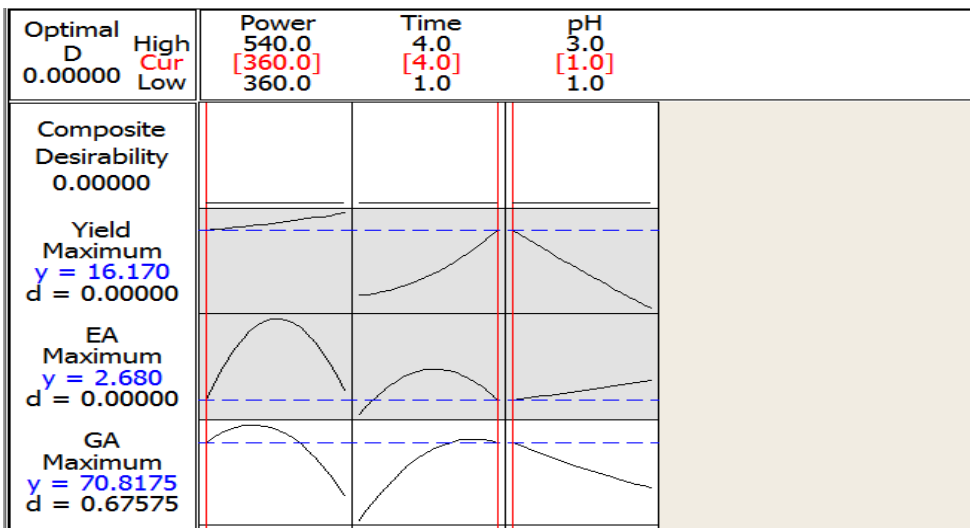
شکل 4-اثر متغیرهای مستقل توان/ زمان (الف)، توان/ pH (ب) و زمان/ pH (ج) بر میزان فعالیت امولسیفایری پکتین پوست بادنجان

ویسکوزیته

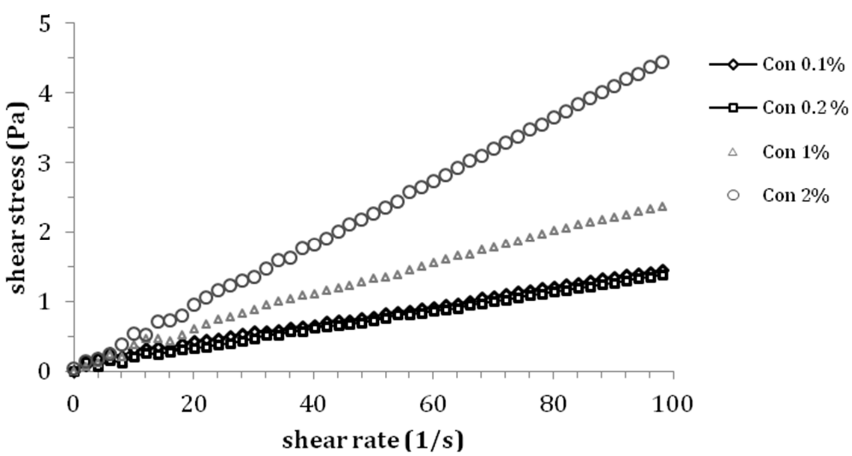
رفتار جریانی پکتین استخراج شده در شرایط بهینه در غلظت‌های 0/1، 0/2، 1 و 2 درصد در نرخ‌های برش مختلف در شکل 6 نشان داده شده است که بیانگر وجود رفتار نیوتنی برای پکتین استخراج شده می‌باشد. میزان ویسکوزیته محلول‌های مختلف پکتین استخراجی در شرایط بهینه در غلظت‌های 0/1، 0/2، 1 و 2% وزنی- حجمی در سرعت 50 دور بر دقیقه به‌ترتیب برابر با 1/55، 1/59، 2/6 و 4/55 سانتی پوآز می‌باشد. همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش غلظت، میزان ویسکوزیته محلول‌ها نیز افزایش یافته است. شاخص‌های (اندیس جریان و ضریب قوام) حاصل از برازش داده‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته بر مدل‌های مختلف رئولوژیکی (نیوتنی و توان) برای پکتین حاصل از

پوست بادنجان در شرایط بهینه استخراج در جدول 4 نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشخص است.

محققین رفتار معمول و رایج برای محلول پکتینی را رفتار رقیق‌شونده با برش[1] دانسته‌اند و این مساله را به جهت‌گیری زنجیره‌های زنجیره‌های پلیمری آن در جهت جریان مرتبط می‌دانند، بنابراین این ماده مقاومت کمتری نسبت به جریان دارد. همچنین در مطالعات مختلف بیان شده که ویسکوزیته پکتین به غلظت گالاکتورونیک اسید در آن نیز، وابسته بوده و با افزایش غلظت آن، ویسکوزیته ایجاد شده توسط پکتین نیز افزایش می‌یابد (Panouille *et al.*, 2006). جعفری و همکاران (2017) نیز گزارش کردند پکتین استخراج شده از تفاله هویج در غلظت 1 درصد حجمی/ وزنی رفتار رقیق‌شونده با برش (سودوپلاستیک) داشته است. در تحقیقی دیگر حسینی و همکاران (2016) اعلام داشتند پکتین استخراجی از پوست نارنج در غلظت‌های کم‌تر از 1 درصد حجمی/ وزنی رفتار نیوتنی داشته است و با افزایش غلظت پکتین رفتار رقیق شونده با برش (سودوپلاستیک) غالب گردیده است. ناطقی و انصاری (1396) نیز در رابطه با پکتین استخراجی از کلاهک بادنجان به کمک حرارت‌دهی در آون در شرایط اسیدی به نتایج مشابهی در زمینه ویسکوزیته دست یافتند (ناطقی و انصاری، 1396).



شکل 5- شرایط بهینه برای راندمان استخراج، میزان گالاکتورونیک اسید و فعالیت امولسیفایری پکتین استخراجی از پوست بادنجان



شکل 6- تنش برشی در برابر نرخ برش محلول‌های پکتین در غلظت‌های مختلف

1 Shear thining

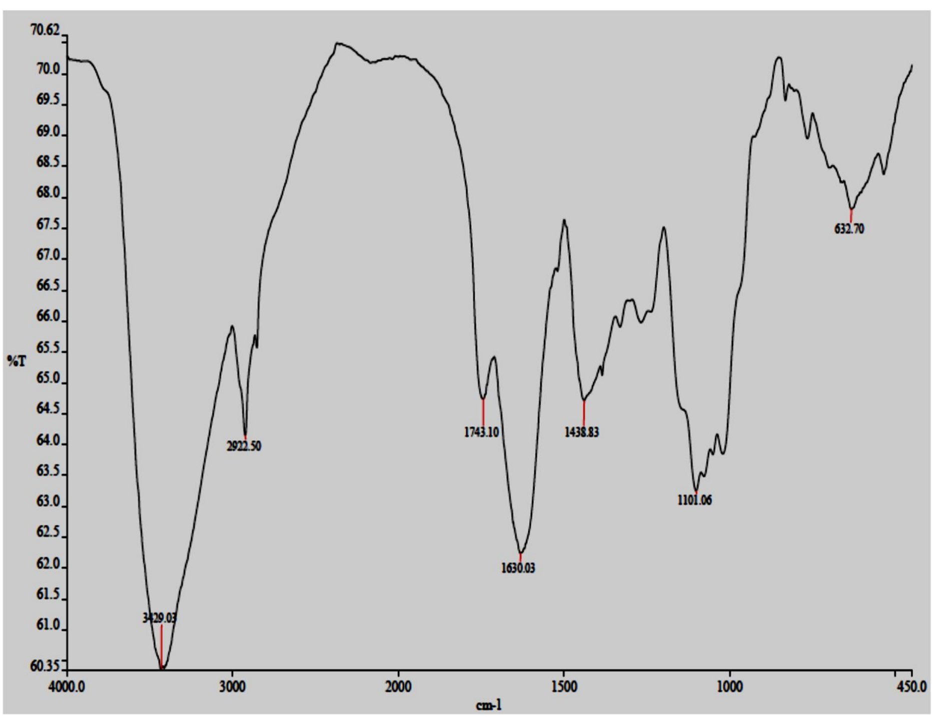
جدول 4- شاخص‌های حاصل از برازش داده‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته بر مدل‌های مختلف رئولوژیکی برای پکتین حاصل از پوست بادنجان در شرایط بهینه استخراج*.

غلظت (w/v%)	مدل	N	k (Pa s^n)	R^2 (%)
0/1	نیوتنی	1	0/013	99/4
	توان	0/96	0/015	98/1
0/2	نیوتنی	1	0/013	99/7
	توان	0/99	0/017	99/2
1/0	نیوتنی	1	0/023	99/5
	توان	0/98	0/042	99/1
2/0	نیوتنی	1	0/045	99/9
	توان	0/95	0/054	99/3

*N برابر اندیس رفتار جریان، k برابر شاخص قوام و R^2 برابر ضریب تبیین در معادله قانون توان می‌باشند.

بررسی طیف FTIR

یکی از راه‌های شناسایی ساختار پکتین استفاده از طیف FTIR است. طیف حاصل از اسپکتروسکوپی مادون قرمز فوریه مربوط به نمونه پکتین استخراجی از پوست بادنجان در شرایط بهینه در شکل 7 نشان داده شده است. ناحیه جذبی قوی بین 3500-3300 بر سانتی‌متر مربوط به گروه‌های OH موجود در قسمت‌های مختلف ساختار پلیمر گالاکتورونیک اسید است. پیک موجود درعدد موجی 2922 بر سانتی‌متر مربوط به ارتعاشات C-H می‌باشد که شامل ارتعاشات خمشی و کششی گروه‌های CH، CH_2 و CH_3 است (Santos *et al.*, 2013). به همین ترتیب، پیک 1743 مربوط به ارتعاشات O-CH_3 می‌باشد. گروه‌های کربوکسیلات دارای دو پیک هستند: (1) ارتعاشات کششی نامقارن در 1630 بر سانتی‌متر، (2) ارتعاشات کششی متقارن ضعیف‌تر در 1438 بر سانتی‌متر. به طور کلی به مجموع پیک‌های ناحیه بین 1200 و 800، منطقه اثر انگشت گویند که یک ناحیه منحصر به فرد بوده (Hosseini *et al.*, 2016) و تفسیر باندهای آن عموما دشوار است.



شکل 7- طیف FTIR پکتین حاصل از پوست بادنجان در شرایط استخراج بهینه

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش استخراج به کمک امواج مایکروویو برای تولید پکتین از پوست بادنجان به‌عنوان یک منبع جدید استفاده شد. سپس خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کاربردی پکتین استخراجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر راندمان استخراج، درجه استریفیکاسیون، میزان گالاکتورونیک اسید و فعالیت امولسیفایری در توان 360 وات، زمان 4 دقیقه و pH برابر با 1/0 بوده که راندمان استخراج در این شرایط برابر با 16/17، درجه استریفیکاسیون برابر با 35/31، میزان گالاکتورنیک اسید برابر با 70/81 و میزان فعالیت امولسیفایری برابر با 2/68 درصد پیش‌بینی شده اند. آزمون تأییدیه، که شامل بررسی میزان این پارامترها در شرایط بهینه پیش بینی شده با سه تکرار بوده است نشان داد که راندمان استخراج در این شرایط برابر 0/23 ±16/08، درجه اسریفیکاسیون برابر با 0/30 ±35/10، میزان گالاکتورنیک اسید برابر با 0/50 ±70/29 درصد و میزان فعالیت امولسیفایری برابر با 0/12 ±2/40 درصد بوده اند. بنابراین نزدیک بودن میزان مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده نشان از صحت میزان اعداد پیش‌بینی شده دارد. پکتین استخراج در شرایط بهینه خاصیت افزایش ویسکوزیته را دارا بوده و همچنین خصوصیات پایداری امولسیون خوبی را از خود نشان داد. در کل این مطالعه نشان داد که می‌توان از روش مایکروویو به‌عنوان یک روش نوین و با کارایی بالا برای استخراج پکتین از ضایعات مواد غذایی استفاده نمود.

منابع

ابراهیم‌پور، ن.، پیغمبردوست، س. ه. و آزاد مرد دمیرچی، ص.، 1389، تاثیر افزودن پکتین، گوار و کاراگینان بر روی ویژگی‌های کیفی نان حجیم بدون گلوتن، مجله پژوهش های صنایع غذایی، جلد 3، شماره 2، ص 98-86..

انتشارات مرکز گمرک ایران، 1373، آمارنامه‌ی واردات و صادرات ایران، مرکز گمرک ایران، تهران.

ناطقی، ل. و انصاری، س.، 1396، استخراج و بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی پکتین استخراجی از ضایعات کلاهک بادنجان، فصلنامه فناوری های نوین غذایی، دوره 5، شماره2.

Anonymous. 19 February 2019. Pectin – A global market overview [press release]. Available at: http://www.industry-experts.com/verticals/food-and-beverage/pectin-a-global-market-overview.

Bagherian, H., Zokaee Ashtiani, F., Fouladitajar, A., & Mohtashamy, M., 2011, Comparisons between conventional, microwave-and ultrasound-assisted methods for extraction of pectin from grapefruit. Chemical Engineering and Processing: *Process Intensification*, 50(11), 1237–1243.

Dalev, P. G., & Simeonova, L. S., 1995, Emulsifying properties of protein–pectin complexes and their use in oil-containing foodstuffs. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 68(2), 203-206.

FAO, 2017. Statistical Database. Available from: <http://www.fao.org>. Retrieved 2019-04-03

Hosseini, S. S., Khodaiyan, F., & Yarmand, M. S., 2016b, Optimization of microwave assisted extraction of pectin from sour orange peel and its physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*, 140, 59–65.

Jafari, F., Khodaiyan, F., Kiani, H., & Hosseini, S. S., 2017, Pectin from carrot pomace: Optimization of extraction and physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*, 157, 1315–1322.

Kazemi, M., Khodaiyan, F., Labbafi, M., Hosseini, S. S., & Hojjati, M., 2019, Pistachio green hull pectin: Optimization of microwave-assisted extraction and evaluation of its physicochemical, structural and functional properties. *Food Chemistry*, 271, 663-672.

Kazemi, M., Khodaiyan, F., & Hosseini, S.S., 2019, Eggplant peel as a high potential source of high methylated pectin: Ultrasonic extraction optimization and characterization, *LWT - Food Science and Technology* (in press).

Li, D., Jia, X., Wei, Z., & Liu, Z., 2012, Box–Behnken experimental design for investigation of microwave-assisted extracted sugar beet pulp pectin. *Carbohydrate Polymers*, 88(1), 342–346.

Ma, S., Yu, S., Zheng, X., Wang, X., Bao, Q.D., & Guo, X., 2013, Extraction, characterization and spontaneous emulsifying properties of pectin from sugar beet pulp. *Carbohydrate Polymers*, 98(1), 750–3.

Maran, J.P., Sivakumar, V., Thirugnanasambandham, K., & Sridhar, R., 2013, Optimization of microwave assisted extraction of pectin from orange peel. *Carbohydrate Polymers*, 97(2), 703–709.

Mesbahi, G.; Jamalian, J., & Farahnaky, A., 2005, A comparative study on functional properties of beet and citrus pectins in food systems. *Food Hydrocolloids*, 19(4), 731–738.

Mort, A.J., Qiu, F., & Maness, N.O., 1993, Determination of the pattern of methyl esterification in pectin: distribution of contiguous non esterified residues. *Carbohydrate Research*, 247, 21–35.

Panouillé, M., Thibault, J. F., & Bonnin, E., 2006, Cellulase and protease preparations can extract pectins from various plant byproducts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(23), 8926-8935.

Samavati, V., 2013, Polysaccharide extraction from *Abelmoschus esculentus*: Optimization by response surface methodology. *Carbohydrate Polymers*, 95(1), 588–597.

Santos, J. D. G., Espeleta, A. F., Branco, A., & de Assis, S. A., 2013, Aqueous extraction of pectin from sisal waste. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 1997-2001.

Wai, W.W., Alkarkhi, A.F.M., & Easa, A.M., 2009, Optimization of pectin extraction from durian rind (Durio zibethinus) using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 74(8), C637–C641.

Wang, S., Chen, F., Wu, J., Wang, Z., Liao, X., & Hu, X., 2007, Optimization of pectin extraction assisted by microwave from apple pomace using response surface methodology. Journal of Food Engineering, 78(2), 693-700.

Yan, M.M., Liu, W., Fu, Y.J., Zu, Y.G., Chen, C.Y., & Luo, M., 2010, Optimisation of the microwave-assisted extraction process for four main astragalosides in Radix Astragali. *Food Chemistry*, 119(4), 1663–1670.

Yapo, B. M., Robert, C., Etienne, I., Wathelet, B., & Paquot, M., 2007, Effect of extraction conditions on the yield, purity and surface properties of sugar beet pulp pectin extracts. *Food Chemistry*, 100(4), 1356-1364.

Yeoh , S., Zhang , S., Shi, J., Langrish, T. A. G., 2008, A comparison of different techniques for water-based extraction of pectin from orange peels. *Chemical Engineering Communications*, 195:5, 511-520,

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 15, No. 5, Dec- Jan 2020, p. 649-665

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 15، شماره 5، آذر - دی 1398، ص.665-649

Pectin extraction from eggplant peel using microwave and evaluation of its properties

S. Karamzadeh[1], S. Ansari[2*]

Received: 2018.11.06
Accepted: 2019.05.15

Introduction: Pectin is a complex mixture of polysaccharides in the primary cell wall of plants which is a polymer of α-galacturonic acid, to which neutral sugar is connected to form aside chain. Pectin is a natural food additive used extensively in the food industry as thickener, texturizer, emulsifier, stabilizer and gelling agent. In 2018, the world market demand for pectin was in excess of 60,000 tons and Europe was estimated to have the largest market with 31,000 tons (valued about US$420). In Iran, about one hundred tons of pectin is consumed annually in the food and pharmaceutical industries, all of which are supplied from abroad, and due to its price in the world market is of considerable magnitude. Therefore, the study of its production within the country could be of great importance. During processing and canning of eggplant, its cap and skin are discarded as waste which can be considered as a valuable ingredient in the food industry. The main objective of this study was to develop an MAE (Microwave assisted extraction) of pectin from eggplant peel and investigate the effect of process variables (microwave power, irradiation time and pH) and the response (extraction yield, degree of esterification, galacturonic acid content and emulsifying activity); and to obtain optimum conditions for maximum extraction yield of pectin from eggplant peel. The response surface methodology (RSM) using Box-Behnken design was employed in this study.

Material and methods: Eggplant peels were provided by Yek-o-Yek factory as an unwanted by-product. Then, the peels were divided into small pieces and dried in hot air oven at 65 °C until it attains constant weight. The peels were then grinded and passed through a 40-mesh sieve to obtain powdered sample. The independent variables examined were microwave power (360–450–540 W), irradiation time (1–2.5–4 min) and solution pH (1–2–3). MAE of pectin was performed in an ordinary household microwave oven with a total of 17 treatments according to RSM. About 5 g of dried eggplant peel powder was weighed and placed into a 250 ml beaker, 75 ml distilled water (the liquid-solid ratio 15:1 v/w) containing different pH values was added and exposed to microwave radiation at different powers for the selected irradiation times. After microwave heating, the mixture in the beaker was allowed to be cooled down and filtered using filter paper (Whatman no-1). The filtered extract was centrifuged and the supernatant was precipitated with an equal volume of 98% (v/v) ethanol. The coagulated pectin mass was washed with 98% (v/v) ethanol for two times and dried in oven at 60 ° C until it attains constant weight. The pectin extraction yield was calculated by dividing the weight of dried pectin to the weight of dried eggplant peel powder. Galactoronic acid content of pectins was determined using the meta-hydroxydiphenyl method. The esterification degree of the pectins was determined by the titrimetric method with minor modifications. The emulsifying activity (EA) of the eggplant peel pectins were analyzed according to the method by Dalev & Simeonova (1995). Optimum extraction conditions to achieve maximum extraction efficiency, degree of esterification, galacturonic acid content and emulsifying activity were determined. Then, the stability of the oil-based emulsion prepared by mixing 0.5% w/w solution of pectin extracted in optimal conditions and corn oil, were examined at 4 and 23 ° C. In addition, the behavior of pectin extracted under optimal conditions (at concentrations of 0.1, 0.2, 1 and 2%) and its spectra using a Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) were investigated.

Results and discussion: The results indicated that the extraction efficiency, esterification degree, the amount of galacturonic acid, and the emulsifying activity of the pectins extracted were 2.20- 17.16%, 20.20- 36.13%, 51.3- 74.7%, and 1.87- 21.64%, respectively. With increasing microwave power, irradiation time and decrease of solution pH the extraction efficiency of pectin extracted increased, while esterification degree decreased. The amount of galacturonic acid and emulsifying activity showed an upward trend up to microwave power of 450 watts and the irradiation time of 3 minutes after which demonstrated a downward trend. The optimum conditions for reach to the maximum extraction yield, galacturonic acid content and emulsifying activity were in microwave power of 360 W, irradiation time of 4 min and pH of 1 that at these conditions, the extraction yield of 16.17, galacturonic acid content of 70.81 and emulsifying activity of 2.68 were predicted. Also, these observations indicated that with increase in concentration, the flow behavior of pectin

1 and 2. M.Sc. Graduated student and Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Islamic Azad University, Branch of Kazerun, Kazerun.
(*Corresponding Author Email: ansari.fse@gmail.com or ansari@kau.ac.ir)

solutions was changed from Newtonian to pseudo-plastic. In addition the stability of pectin-stabilized emulsion at 4°C was more than 23°C. In general, this study showed that the microwave method could be used as a novel and high-performance method for extracting pectin from eggplant peel.

Keywords: Pectin, Eggplant peel, Optimization, Physicochemical properties.